

地区农业节水灌溉项目投资方案优选 ——基于格序理论与组合赋权的决策方法

王丰凯, 吴凤平, 于倩雯, 朱玮
(河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 为对地区农业节水灌溉项目投资做出科学决策, 结合项目投资决策的不确定性、多目标性等特点, 针对单一主观或者客观赋权方法的缺陷问题, 提出一种基于格序理论与组合赋权的地区农业节水灌溉项目投资方案优选决策方法。首先, 通过构建优化模型对决策指标的主、客观权重进行优化组合, 求得组合权重值; 然后, 运用格序决策理论, 构建农业节水灌溉项目投资方案优选模型, 结合加权 Kaufmann 距离的概念, 对备选方案进行优选排序; 最后, 结合算例验证该方法的可行性和有效性。

关键词: 节水灌溉; 变异系数法; 三角模糊数; 组合赋权; 格序决策

中图分类号: TV93; S274

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0234-05

Optimization of investment decision – making for agricultural water-saving projects based on lattice-order theory and combination weights

WANG Fengkai, WU Fengping, YU Qianwen, ZHU Wei

(Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to make scientific decisions on the investment of regional agricultural water-saving irrigation project, considering the investment decisions to be uncertain and multi-objective, and the single subjective or objective weights method to be defective, a decision-making method of optimization of investment for agricultural water-saving irrigation projects based on lattice-order theory and combination weights is proposed. First, the value of combined weights was obtained by constructing the optimization model to optimize the combination of subjective weights and objective weights of the decision indexes. Then an optimal model of investment decision-making for agricultural water-saving irrigation projects was proposed using the lattice-order theory, and the alternatives were sorted and chosen by combining with the concept of weighted Kaufmann distance. At last, the feasibility and effectiveness of the method were illustrated by a computational example.

Key words: water-saving irrigation; coefficient variation; triangular fuzzy number; combination weights; lattice order decision-making

地区农业节水灌溉项目投资方案优选问题是一个多属性的多目标决策问题, 其决策指标涉及到经济、技术和社会等多方面内容, 且目标准则下的各决策指标间还存在矛盾性和不可公度性等问题。因此, 农业节水灌溉项目投资方案优选问题需要从多层次、多角度来研究。目前, 关于农业节水灌溉项目投资决策方法的研究已取得一定成果。国内学者运用如模糊综合评判方法^[1-3]、逼于理想解 TOPSIS

法^[4-7]、灰色关联分析^[8-9]、集对分析^[10]以及证据理论^[11]等方法对节水灌溉项目投资方案的优选进行了有效探索。这些模型方法的提出与运用对于节水灌溉项目投资方案优选的科学决策起到了积极促进作用, 但以上方法在确定决策指标权重时, 多依赖于单一主观或客观赋权方法, 往往只考虑客观数据或主观评价单方面因素, 得到的决策指标权重也就不全面、不科学。

收稿日期: 2017-02-05; 修回日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271537); 国家社会科学基金重大项目(12&ZD214); 江苏省高校研究生科研创新计划省立省助项目(KYZZ15-0159)

作者简介: 王丰凯(1992-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为管理科学方法与应用。

通讯作者: 吴凤平(1964-), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源管理与规划。

我国郭耀煌等^[12]首先提出格序决策理论,用来解决多目标决策问题。他指出格序能真实反映出决策者偏好,并借助格序建立格序决策理论,之后格序决策理论被广泛应用于各种决策领域。郝光等^[13]将格序决策理论进行改进,并应用于交通运输规划方案决策中;吴先聪等^[14]将格序决策方法与模糊多目标决策结合,并首次应用于管理者绩效评价中;吴凤平等^[15]运用格序理论思想将全序决策拓展为格序决策,并结合证据理论成功运用于水资源配置方案的综合评价中。本文在前人研究的基础上,考虑农业节水灌溉项目是一个综合经济、技术、社会和生态等的复杂系统,针对地区农业节水灌溉项目投资方案综合优选决策中多目标之间的矛盾性、不可公度性问题,构建基于格序理论与组合赋权的地区农业节水灌溉项目投资方案优选方法,为地区农业节水灌溉工程项目投资决策提供参考。对节水灌溉项目投资决策方法的探索对于我国节水农业的发展、保障我国粮食安全以及创建节水型社会具有重要的意义。

1 农业节水灌溉项目投资决策优选模型

1.1 问题描述与基本假设

地区在进行大型节水灌溉工程规划设计时,假设有 m 种建设方案可供投资选择,记 $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为节水灌溉项目投资方案集, A_i 表示第 i 个投资建设方案; $B_j = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 为节水灌溉项目投资决策指标集, B_j 表示影响节水灌溉项目投资方案优选的第 j 个决策指标。不同投资方案 A_i 下各决策指标 B_j 的数值构成决策的原始指标值矩阵为 $T = (x_{ij})_{m \times n}$ 。假设运用变异系数法确定的指标客观权重向量为 $O = (o_1, o_2, \dots, o_n)^T$, 且满足 $\sum_{j=1}^n o_j = 1$; 运用三角模糊数法确定的指标主观权重向量为 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$, 亦满足 $\sum_{j=1}^n s_j = 1$; 最后通过优化方法计算各决策指标组合权重向量为 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$, 且满足 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

1.2 指标数据规范化

在对地区农业节水灌溉项目投资方案进行组合赋权的格序优选时,首先要对原始数据指标值矩阵 $T = (x_{ij})_{m \times n}$ 进行规范化处理,得到规范化决策指标矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 其目的在于消除不同类型决策指标间的不可公度性。常用方法有线性变换方法、标准

0-1 变换、向量规范化等^[13], 本文采用线性变换方法, 具体计算方法如下:

(1) 对于效益型指标 j :

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (1)$$

(2) 对于成本型指标 j :

$$y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (2)$$

1.3 指标权重的确定

1.3.1 变异系数法确定客观权重 变异系数法根据各项指标观测值的变异程度大小来判断各项指标对被评价对象的影响程度, 在评价指标体系中, 变异程度越大的指标就说明该项指标越难以实现, 也就越能够反映对被评价对象影响的差距, 也就需要赋予该项指标越大的权重, 反之则越小。通过变异系数法确定决策指标权重可以充分挖掘指标数据所包含的信息, 避免赋权时主观因素影响过大。利用变异系数法求指标权重首先需要计算指标的变异系数 γ_j :

$$\gamma_j = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}}{\bar{x}_j} \quad (3)$$

式中: $\bar{x}_j$ 为第 j 项指标特征值的均值。然后根据指标变异系数值来求解第 j 项指标的客观权重 o_j :

$$o_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{j=1}^n \gamma_j} \quad (4)$$

1.3.2 三角模糊数法确定主观权重 三角模糊数法的核心思想是: 由熟悉农业节水灌溉项目的 t 位专家组成一个分析小组, 专家采用 0.1 ~ 0.9 标度评判标准对各决策指标的相对重要程度进行评判, 并建立模糊判断矩阵, 接着计算决策指标的综合重要度矩阵, 根据综合重要度矩阵计算每个指标优于其他指标的可能性程度, 最后根据可能性程度确定节水灌溉项目投资方案优选过程中各决策指标的主观权重^[16-17]。具体计算过程如下:

(1) 建立模糊判断矩阵。

利用三角模糊数两级比例法, 根据 t 位专家判定的各决策指标的相对重要性, 建立模糊判断矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} (l_{11}, r_{11}, u_{11}) & (l_{12}, r_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1t}, r_{1t}, u_{1t}) \\ (l_{21}, r_{21}, u_{21}) & (l_{22}, r_{22}, u_{22}) & \cdots & (l_{2t}, r_{2t}, u_{2t}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (l_{nt}, r_{nt}, u_{nt}) & (l_{n2}, r_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (l_{nt}, r_{nt}, u_{nt}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: l_{nt} 为三角模糊数的下界, 表示专家给出的保

守评价; u_{nt} 为三角模糊数的上界, 表示专家给出的乐观评价; r_{nt} 为专家按指标相对重要程度给出的最可能评价。

(2) 计算评价指标综合重要度矩阵。

设 $R_E = ((l_1^e, r_1^e, u_1^e), (l_2^e, r_2^e, u_2^e), \dots, (l_n^e, r_n^e, u_n^e))$, 其中 $l_j^e = \sum_{k=1}^t l_{jk}, r_j^e = \sum_{k=1}^t r_{jk}, u_j^e = \sum_{k=1}^t u_{jk}, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, t$ 。设 R_j 为模糊判断矩阵 M 中第 j 个决策指标相对于其他决策指标的综合重要度值, 则利用公式(6):

$$R_j = (l_j, r_j, u_j) = (l_j^e, r_j^e, u_j^e) \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^n u_j^e}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n r_j^e}, \frac{1}{\sum_{j=1}^n l_j^e} \right)^T \quad (6)$$

计算得到决策指标的综合重要度矩阵 $R = (R_j)_{n \times t}$ 。

(3) 计算决策指标的可能性程度。

三角模糊数 $R_1 \geq R_2$ 的可能性程度用 $P(R_1 \geq R_2)$ 表示, 则:

$$P(R_1 \geq R_2) = \begin{cases} 1, & r_1 \geq r_2 \\ \frac{u_1 - l_2}{(r_1 - u_1) - (r_2 - l_2)}, & r_1 < r_2, u_1 > l_2 \\ 0, & r_1 < r_2, u_1 \leq l_2 \end{cases} \quad (7)$$

(4) 确定各决策指标的主观权重。

设 $v(d_j) = P(R_j \geq R_1, R_2, \dots, R_n)$ 表示任一决策指标优于其他决策指标的可能性程度, 则根据公式(8)计算:

$$v(d_j) = P(R_j \geq R_1, R_2, \dots, R_n) = \min P(R_j \geq R_p) \quad (8)$$

式中: $p = 1, 2, \dots, n, p \neq j$, 可得决策指标的期望权重向量 $s' = (v(d_1), v(d_2), \dots, v(d_n))$ 。根据公式(8)计算的结果, 经归一化处理后可得决策指标的主观权重向量为:

$$s_j = \frac{v(d_j)}{\sum_{j=1}^n v(d_j)}, j = 1, 2, \dots, n, \text{ 且 } \sum_{j=1}^n s_j = 1 \quad (9)$$

1.3.3 优化组合赋权确定指标权重 组合赋权是将主、客观指标权重即三角模糊数法与变异系数法分别确定的主客、观权重进行综合优化。本文构建的组合权重优化模型的思想是使组合权重值与主、客观权重值之间的差值最小, 具体优化模型构建为:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{j=1}^n [| \omega_j - o_j | + | \omega_j - s_j |] \\ \text{s. t.} \quad \omega_j &\geq 0 \\ \sum_{j=1}^n \omega_j &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: o_j 为客观权重; s_j 为主观权重; ω_j 为组合权重。

1.4 节水灌溉项目投资方案优选模型

基于格序理论与组合赋权的地区农业节水灌溉项目投资方案优选方法的主要思路和步骤是: 首先, 融合计算得到的规范化决策指标矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 和组合权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 的信息, 得到加权决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$; 然后, 根据加权决策矩阵中的各决策指标值的大小确定正、负加权理想解, 来构造虚拟格; 接着结合格序决策理论分别计算各备选方案与正、负加权理想解的 Kaufmann 距离; 最后, 计算各备选方案与正、负加权理想解的综合距离, 并以综合距离的大小对节水灌溉项目投资方案进行排序, 用来确定最优方案。具体优选步骤如下:

(1) 利用公式(10) 计算得到的组合权重向量 ω_j 和决策指标矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, 构造加权决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 选取加权决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 中各决策指标的指标值所对应的极大值 C_j^+ 作为正加权理想解, 极小值 C_j^- 作为负加权理想解, 得到正、负加权理想解向量 $C_j^+ = (C_1^+, C_2^+, \dots, C_n^+)$ 和 $C_j^- = (C_1^-, C_2^-, \dots, C_n^-)$, 然后以正加权理想解为偏序集顶元素、负加权理想解为偏序集底元素组成一个虚拟格。

(3) 根据公式(11) 分别计算节水灌溉项目投资方案 A_i 与正加权理想解 C_j^+ 、负加权理想解 C_j^- 的距离 D_i^+ 和 D_i^- :

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [D(z_{ij}, C^+)]^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [D(z_{ij}, C^-)]^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $D(z_{ij}, C^+)$ 和 $D(z_{ij}, C^-)$ 表示两者之间的加权 Kaufmann 距离。

(4) 根据公式(12) 计算各方案 $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 的综合距离:

$$D_i = q \frac{D_i^-}{D} + (1 - q) \left(1 - \frac{D_i^+}{D} \right) \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

式中: D 为 C^+ 与 C^- 之间的距离; q 为乐观系数, 一般取 0.5。

(5) 最后,决策者按照 D_i 值大小对节水灌溉项目投资方案进行排序择优选择。

2 算例分析

本文选择辽宁省阜新蒙古族自治县为案例进行节水灌溉项目投资方案的优选决策研究。阜新蒙古族自治县位于我国辽宁省的西北部,属北温带大陆性气候,受东南亚季风影响,降水时空分布不均,具有旱涝交替、连续干旱等特点。多年平均降雨量 500 mm 左右,多年平均水面蒸发量 1 746 mm,缺水干旱的气候特点严重束缚当地农业经济的发展^[3]。随着节水农业的发展,当地缺水情况有所好转,但水资源仍然限制着该地区农业的可持续发展。

近年来,该地区为集中连片治理农业水资源短缺问题,拟对全区进行节水灌溉技术推广。在进行大型节水灌溉项目投资决策时,综合考虑当地以种植玉米为主,现有 4 种方案可供投资选择:低压管道灌溉、半固定式喷灌、移动式喷灌和滴灌(分别记为 A_1, A_2, A_3, A_4)。

从经济、技术和社会 3 个层面来考虑决策指标,确定每公顷投资(元/hm²)、年运行维护费(元/a)、投资回收期(a)、益本比(%)、灌水均匀度(%)、灌溉水有效利用率(%)、节水程度、作物适用性、农民接受程度和便于维护程度共 10 个决策指标,按顺序标记为 $B_1, B_2, \dots, B_{10}$, 各方案的原始指标值如表 1 所示。

表 1 某地区农业节水灌溉项目投资方案决策指标值

方案	评价指标									
	经 济				技 术			社 会		
	$B_1/(元 \cdot hm^{-2})$	$B_2/(元 \cdot a^{-1})$	B_3/a	$B_4/\%$	$B_5/\%$	$B_6/\%$	B_7	B_8	B_9	B_{10}
A_1	6,645.00	100.00	2.60	1.80	80.00	0.90	0.3	0.80	1.00	0.90
A_2	10,000.00	150.00	3.20	1.30	85.00	0.70	0.4	0.70	0.90	0.90
A_3	6,300.00	95.00	2.20	1.10	85.00	0.60	0.5	0.60	0.70	0.90
A_4	11,200.00	168.00	2.80	1.90	95.00	0.90	0.6	0.95	0.90	0.80

具体优选步骤如下:

Step1:根据公式(1)、(2)对表 1 数据进行规范化处理,得到规范化决策指标矩阵:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} 0.948 & 0.950 & 0.813 & 0.947 & 0.842 & 1.000 & 0.500 & 0.842 & 1.000 & 1.000 \\ 0.630 & 0.633 & 1.000 & 0.684 & 0.895 & 0.778 & 0.667 & 0.737 & 0.900 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.688 & 0.579 & 0.895 & 0.667 & 0.833 & 0.632 & 0.700 & 1.000 \\ 0.563 & 0.565 & 0.875 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.900 & 0.899 \end{bmatrix}$$

Step2:根据公式(3)、(4) 计算各决策指标的客观权重。得到的客观权重向量为:

$$o_j = (0.095, 0.102, 0.079, 0.087, 0.112, 0.103, 0.121, 0.120, 0.084, 0.097)^T$$

利用三角模糊数法计算决策指标的主观权重。首先,请 3 位熟悉该地区农业节水灌溉发展情况的专家根据各决策指标的相对重要性做出评价,并依据专家给出的标度建立模糊判断矩阵 M 。根据公式(6) 计算得到决策指标的综合重要度矩阵:

$$R = (R_j)_{10 \times 1} = \begin{bmatrix} (l_1, r_1, u_1) \\ (l_2, r_2, u_2) \\ (l_3, r_3, u_3) \\ (l_4, r_4, u_4) \\ (l_5, r_5, u_5) \\ (l_6, r_6, u_6) \\ (l_7, r_7, u_7) \\ (l_8, r_8, u_8) \\ (l_9, r_9, u_9) \\ (l_{10}, r_{10}, u_{10}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0.07, 0.10, 0.13) \\ (0.06, 0.09, 0.13) \\ (0.06, 0.08, 0.09) \\ (0.07, 0.10, 0.12) \\ (0.08, 0.11, 0.14) \\ (0.08, 0.10, 0.13) \\ (0.08, 0.11, 0.15) \\ (0.10, 0.12, 0.15) \\ (0.06, 0.09, 0.12) \\ (0.08, 0.10, 0.13) \end{bmatrix}$$

根据公式(7)、(8) 计算出各决策指标的期望权重向量为:

$$s' = (0.312, 0.294, 0.280, 0.324, 0.332, 0.351, 0.357, 0.386, 0.388, 0.305)^T$$

根据公式(9) 经归一化后得各决策指标的主观权重向量为:

$$s_j = (0.094, 0.088, 0.084, 0.097, 0.100, 0.105, 0.107, 0.116, 0.117, 0.092)^T$$

将决策指标的主客观权重值代入公式(10), 运用 Matlab 软件求解, 得到各决策指标的组合权重向量为:

$$\omega_j = (0.094, 0.095, 0.082, 0.092, 0.106, 0.104, 0.114, 0.118, 0.100, 0.094)^T$$

Step3: 根据 Step2 计算得到的组合权重值和标准化决策矩阵构造加权决策矩阵 Z :

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} 0.089 & 0.090 & 0.066 & 0.087 & 0.089 & 0.104 & 0.057 & 0.099 & 0.100 & 0.094 \\ 0.059 & 0.060 & 0.082 & 0.063 & 0.095 & 0.081 & 0.076 & 0.087 & 0.090 & 0.094 \\ 0.094 & 0.095 & 0.056 & 0.053 & 0.095 & 0.069 & 0.095 & 0.075 & 0.070 & 0.094 \\ 0.053 & 0.054 & 0.071 & 0.092 & 0.106 & 0.104 & 0.114 & 0.118 & 0.090 & 0.084 \end{bmatrix}$$

根据加权决策矩阵 Z , 选取各决策指标下的极大值构成正加权理想解 C^+ , 各决策指标下的极小值构成负加权理想解 C^- :

$$C^+ = (0.094, 0.095, 0.082, 0.092, 0.106, 0.104, 0.114, 0.118, 0.100, 0.094)$$

$$C^- = (0.053, 0.054, 0.056, 0.053, 0.089, 0.069, 0.057, 0.075, 0.070, 0.084)$$

根据格序理论, 以 C^+ 为偏序集中的顶元素, C^- 为偏序集中的底元素构造一个虚拟格。

Step4: 根据公式(11), 分别计算各备选方案与 C^+ 、 C^- 之间的 Kaufmann 距离:

$$D_i^+ = (0.0650, 0.0803, 0.0816, 0.0607)$$

$$D_i^- = (0.0821, 0.0647, 0.0957, 0.0936)$$

计算得出 C^+ 、 C^- 之间的 Kaufmann 距离 $D = 0.0426$ 。

Step5: 根据公式(12) 计算出各备选方案与 C^+ 、 C^- 之间的综合距离向量为:

$$D_i = (0.7007, 0.3169, 0.6655, 0.8862)$$

Step6: 将节水灌溉项目投资方案按照 D_i 值从大到小进行排序, 来选择最优投资方案。最终排序结果为: $A_4 - A_1 - A_3 - A_2$, 由此可以得知, 辽宁阜蒙县最应投资的节水灌溉项目是滴灌方案, 其次是低压管道灌溉方案。这与文献[3] 的研究结果基本一致。因为该地区地形以低山丘陵为主, 主要农作物又是玉米、蔬菜、果树也以大面积种植为主, 所以适合用滴灌方式进行补水灌溉, 以取得最优的灌溉效益。另外, 从排序结果上看, 喷灌(包括固定式和半移动式) 不适合在该地区进行推广投资, 同时因该地区多干旱、多风, 采用喷灌产生的蒸发损失会更大, 不利于作物有效灌溉。

3 结 论

(1) 本文基于格序理论与组合赋权提出了一种地区农业节水灌溉项目投资方案优选方法, 并构建了具体优选模型。组合赋权既能充分挖掘指标数据的客观信息, 又能充分考虑专家意见, 比单一赋权更为全面。运用格序理论, 借助 Kaufmann 距离计算各备选方案与正、负加权理想解的综合距离, 并以综合

距离越大越优为标准对备选方案进行优选, 较以往以单一距离为标准对方案进行优选更加合理。

(2) 本文的研究是格序理论在节水灌溉项目投资方案决策领域的新应用, 同时, 该方法能够充分利用原始数据信息, 并能较准确地对工程投资方案进行判断, 也可以应用于其他工程方案决策问题的评价优选, 具有较强的实用价值。

(3) 本文提出的地区农业节水灌溉项目投资方案优选方法还存在一些不足, 如评价过程中存在指标互补现象, 最终方案排序的精度未必会满足决策者的要求等, 因此, 还需对该方法做进一步改进研究。

参考文献:

- [1] 郭文献, 徐建新, 卢双宝. 模糊物元模型在节水灌溉方式优选中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(5): 27-29.
- [2] 梁志刚, 邵建文, 孙东伟. 基于模糊综合评价的区域节水灌溉研究[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(5): 55-57.
- [3] 张旭东, 孙仕军, 迟道才, 等. 二级模糊综合评判法在区域节水灌溉方式优选中的应用[J]. 节水灌溉, 2013(12): 66-69.
- [4] 张春乐, 方崇, 苏超. 基于熵权的 TOPSIS 模型在烤烟节水灌溉制度优选中的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(23): 12635-12637.
- [5] 陈亮亮, 马亮, 赵经华. 变异系数权重 TOPSIS 法在节水灌溉方案评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 95-96.

知,穗期阶段,P-M法模拟效果一般,P-T法与HS法估算蒸散量与实测值相差较大,花粒期阶段3种方法模拟效果有所提高,P-M法与P-T法计算结果可靠。

(3)不同天气条件下各种方法测定蒸散量比较可知,3种方法在晴天的模拟效果要好于阴天,P-M法最优,P-T法次之,HS法模拟效果最差。

由分析结果可知,在进行该农田蒸散量计算时,在精度允许范围内,从计算方法的繁简与需求资料难易角度考虑,P-T法较P-M法更适合。

参考文献:

- [1] 刘树华,于飞,刘和平,等.干旱、半干旱地区蒸散过程的模拟研究[J].北京大学学报,2007,43(3):359-366.
- [2] Rana G, Katerji N, Ittersum M K V, et al. Measurement and estimate of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate[J]. European Journal of Agronomy, 2000,13(2-3):125-153.
- [3] 刘安花,李英年,薛晓娟,等.高寒草甸蒸散量及作物系数的研究[J].中国农业气象,2010,31(1):59-64.
- [4] 刘晓英,林而达.气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J].水利学报,2004,35(2):77-82.
- [5] 杨贵羽,王知生,王浩,等.海河流域 ET_0 演变规律及灵敏度分析[J].水科学进展,2009,20(3):409-415.

- [6] 贾文雄,何元庆,王旭峰,等.祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J].水科学进展,2009,20(2):159-167.
- [7] 张晓龙.农田尺度水碳通量观测与研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [8] 苏建伟.基于通量站的农田蒸散发研究[D].西安:西安理工大学,2014.
- [9] 张淑杰,班显秀,纪瑞鹏,等.农田蒸散量模型构建及蒸散状况分析[J].中国农学通报,2006,22(10):454-458.
- [10] 梁文清,蔡焕杰,王健.陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究[J].节水灌溉,2011(12):1-4.
- [11] 王卫华,邢旭光,吴忠东,等.作物蒸发蒸腾量计算方法研究与展望[J].安徽农业科学.2013(28):11255-11258.
- [12] 李晨,崔宁博,魏新平,等.改进Hargreaves模型估算川中丘陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2015,31(11):129-135.
- [13] 刘倪,夏伟,吴晓蔚,等.几种参考作物蒸散量计算方法的比较[J].河北科技大学学报,2009,30(1):17-24.
- [14] Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. On temperature and water limitation of net ecosystem productivity: Implementation in the C-Fix model[J]. Ecological Modelling, 2006,199(1):4-22.
- [15] Wallach D, Makowski D, Jones J W. Working with dynamic crop models[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.

(上接第238页)

- [6] 邓丽娟,马爱玲.基于CRITIC权重与TOPSIS模型的节水灌溉方案优选[J].水科学与工程,2010(2):10-12.
- [7] 于倩雯,吴凤平,沈俊源.基于区间直觉模糊TOPSIS法的节水灌溉工程方案优选[J].节水灌溉,2016(3):68-71.
- [8] 门宝辉.选择节水灌溉方式的灰色关联投影法[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5):476-479.
- [9] 张小泓.基于变异系数法的灰色关联模型在节水灌溉工程投标方案优选中的应用[J].节水灌溉,2009(8):54-56.
- [10] 戚颖,付强,孙楠.黑龙江省半干旱地区水资源利用程度评价及节水灌溉模式优选[J].节水灌溉,2007(4):7-9.
- [11] 廖梓龙,魏永富,郭中小,等.基于证据理论的灌溉工程方案优选[J].中国农村水利水电,2012(8):30-33.
- [12] 郭耀煌,刘家诚,刘常青,等.格序理论[M].上海:上海

科技出版社,2003.

- [13] 郝光,牟奇峰,张殿业,等.基于格序偏好的模糊多目标决策方法[J].西南交通大学学报,2006,41(4):517-521.
- [14] 吴先聪,刘星.基于格序理论的管理者绩效评价方法[J].系统工程理论与实践,2011,31(2):239-246.
- [15] 吴凤平,贾鹏,张丽娜.基于格序理论的水资源配置方案综合评价[J].资源科学,2013,35(11):2232-2238.
- [16] 吴凤平,陈艳萍.现代决策方法[M].南京:河海大学出版社,2011.
- [17] 杨柳,周进梅,朱玮.基于改进TOPSIS模型的政府工程采购项目评标研究[J].项目管理技术,2015,13(2):51-55.